

ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法の提案

千葉大学大学院 学生会員 川井 修

千葉大学大学院 正会員 丸山 喜久・山崎 文雄

1. 研究の目的

東京ガス(株)のリアルタイム地震防災システム SUPREME¹⁾では、都市ガス供給エリア内に約 4,000 箇所配備した SI センサーによる地震動モニタリングを実施し、その結果は地震直後の緊急対応体制の確立に役立てられている。SI センサーには、地震防災対策の一環として、加速度記録より液状化発生の有無を判定する機能が搭載されている。これは、鈴木ら²⁾の方法がベースとなっており、これまで上下動成分は観測されてはいるが、使用されていなかった。

液状化地点の記録において、水平方向の卓越周期は伸びる傾向があるが、その一方で、上下方向の卓越周期は伸びない傾向が知られている。この特徴は、非排水状態での間隙水圧上昇に起因する土のせん断剛性低下によるものである。現在配備されている地震計の観測記録を利用することができ、地震直後に液状化発生を検知できるものと期待される。

2. 既往の研究

加速度記録から液状化を判定する研究は様々あるが、まず Kostadinov and Yamazaki³⁾の手法を取り上げる。この判定法では、まず、水平2方向・上下方向の加速度記録のうち最初に 40cm/s^2 を越える時刻から最後に 40cm/s^2 を越える時刻までの間について、Hammingウィンドウを用いて平滑化されたフーリエスペクトルをデータ数256を一つの区間として求める。それぞれのフーリエスペクトルから、次式に表される瞬間平均振動数(MIF)を計算する。

$$MIF(t) = \int fP(t, f)df / \int P(t, f)df \quad (1)$$

得られた瞬間平均振動数を用いて、最大速度(PGV)が 10cm/s 以上の場合に液状化の発生を判定する。判定基準は、 $MIF_H \leq 2/3\text{Hz}$ かつ $MIF_V \geq 3\text{Hz}$ が 0.1 秒以上継続した場合には液状化、 $MIF_H \leq 1\text{Hz}$ かつ $MIF_V \geq 3\text{Hz}$ が 0.1 秒以上継続した場合には液状化の疑い、いずれにも当てはまらない場合には非液状化とされている。(添字 H は水平成分、 V は上下成分)

また、実際に東京ガス(株)のSIセンサーでは、SI値が 20cm/s 以上(水平8方向最大値)の地震動が観測された場合に液状化判定を行っている。SIセンサーでは、水平成分のゼロクロス周期が 1.0 秒以上(ただし、このときの加速度振幅が 100cm/s^2 以上)、式(2)で表わされる等価変位²⁾ D が 10cm 以上の条

件すべてを満たした場合、液状化発生と判定される。

$$D \approx 2SI^2 / A_{MAX} \quad (2)$$

3. ゼロクロス周期を用いた液状化判定

使用するデータは、Kostadinov ら³⁾のデータに最近の地震から 29 箇所を追加し、液状化地点(LIQ)15 箇所、液状化の可能性のある地点(SUS)11 箇所、非液状化地点(NON)86 箇所の計 112 地点である。液状化により水平方向の加速度記録が長周期化する様子を捉えるために、ゼロクロスによる時刻歴の周期を考える。この方法は、地動加速度がゼロ線を通った時間幅を震動の半周期と定義し、その時間間隔を2倍することでゼロクロス周期を算出した。

液状化を判定するための特徴量は Kostadinov ら³⁾が用いているものと等価なものとし、継続時間も評価に加えることにした。上下方向の周期が 0.33 秒以下で水平方向の周期 1.5 秒を越えている累積時間を

T_1 とし、同様に周期 1.0 秒を越えている累積時間を T_2 とした。なお、水平方向は2成分(EW, NS方向)があるので、両成分別々に累積時間を取り、その合計を T_1 , T_2 とする。また、ゼロクロス周期を計算する区間については、水平2方向の加速度記録において、どちらかの成分が最初に 40cm/s^2 を越える時刻を判定開始時刻 t_s 、最大振幅発現後に加速度振幅が 100cm/s^2 以下になってから 5 秒後を判定終了時刻 t_E とする。

図-1に各地震記録の T_1 , T_2 の結果を示す。液状化判別のための閾値は $T_1=0.8\text{s}$ とする。このように閾値を定めると、液状化(LIQ)地点が1つ境界線の下方にあるが、これは1964年新潟地震の川岸町での記録である。この地点は、液状化の影響で地震計が設置されている建物が傾いており、水平方向と同時に上下方向の加速度記録も長周期化していたため、累積時間が短くなったものと思われる。

非液状化地点(NON)のいくつかは、 T_1 が 0.8s 以上を示している。このような地点は、強い揺れに見舞われて強非線形性を示した地点や、上下動の周期特性を考慮しても表面波の影響が除去しきれなかった地点であると考えられる。

以上までの検討をふまえて、ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法を図-2のように提案する。まず、地震動のPGV(水平2方向合成値)が 10cm/s 未満で

キーワード 液状化, ゼロクロス周期, 上下動, 表面波, 地動加速度

連絡先 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 TEL 043-290-3528

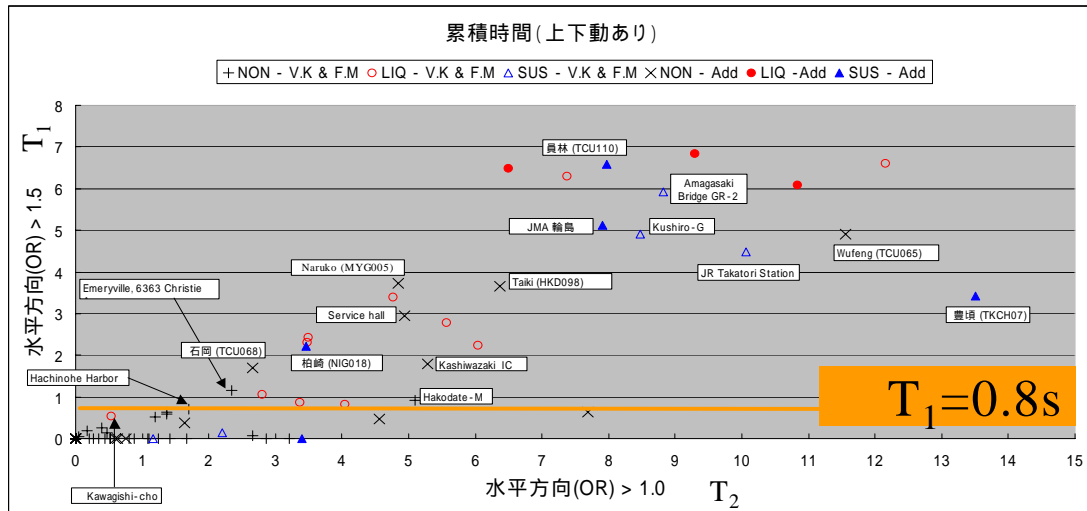


図-1 各地震記録の T_1 , T_2 の結果

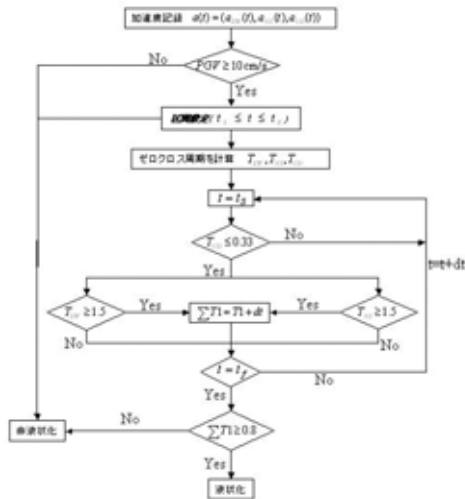


図-2 液状化判定手法のフロー

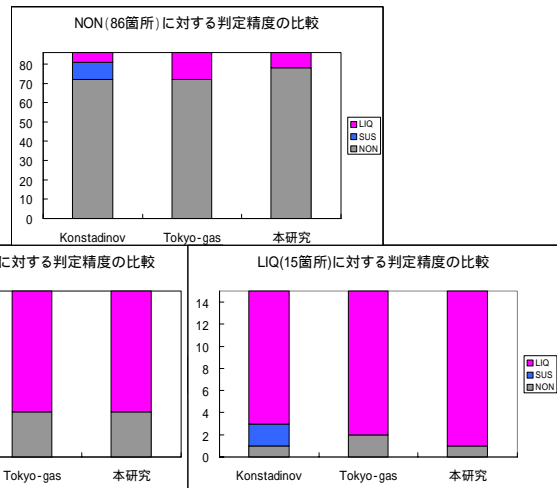


図-3 3つの液状化判定手法の精度比較

あれば地震動が小さいため液状化は発生しないとして、ゼロクロス周期の判定を行わない。液状化判定を行う区間である $t = t_s \sim t_E$ についてゼロクロス周期の閾値の判定とその継続時間を集計し、得られた T_1 をもとに液状化の判定を行う。

本研究の手法に加え、前述の2つの判定手法の3つについて液状化判別の精度を比較する。図-3に液状化地点、液状化が疑わしい地点、非液状化地点ごとに両手法の判定結果を比較する。液状化が疑わしい地点の判定結果に関しては、本研究と現東京ガス(株)の方法は、この判定区分をしていないが、8/11が液状化に判定されている。液状化地点、非液状化地点に関しては、上下成分の周期変化を考慮しているKonstadinovら³⁾及び本研究の手法の方が、上下動を判定に利用していない東京ガス(株)の手法よりも精度が高い。よって、上下動の時刻歴の周期変化を考慮することは、加速度波形から液状化の発生を判定するには重要であると考えられる。

4. 結論

本研究では、液状化発生地点の早期把握を目指し、加速度波形の長周期化の特徴をゼロクロス周期による時刻歴で把握することで、液状化判定を行った。フーリエ変換を用いない本提案手法と周波数領域の計算を用いた既往の手法でほぼ同程度の判定精度が得られた。したがって、本手法は地震計に搭載するリアルタイム液状化判定法として有用であると考えられる。

参考文献

- 1) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Isoyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K. and Nakayama, W.: Development of Real-Time Safety Control System for Urban Gas Supply Network, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 2) 鈴木崇伸, 清水善久, 中山渉: 液状化地盤における強震記録の特徴について, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1223-1228, 1998.
- 3) M. Kostadinov, F. Yamazaki: Detection of Soil Liquefaction from Strong Motion Records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 2, 173-193, 2001.